

APPLICATION UNDER UNITED STATES PATENT LAWS

Atty. Dkt. No. PW 61063.306275
(M#)

Invention: SPECTROGRAPH DEVICE, COFOCAL OPTICAL SYSTEM USING THEREFOR, AND
SCANNING OPTICAL MICROSCOPE

Inventor (s): TAKEHIRO YOSHIDA

Pillsbury Winthrop LLP
Intellectual Property Group
P.O. Box 10500 McLean, VA 22102

Attorneys
Telephone: (703) 905-2000

This is a:

- ☐ Provisional Application
- ☒ Regular Utility Application
- ☐ Continuing Application
 - ☐ The contents of the parent are incorporated by reference
- ☐ PCT National Phase Application
- ☐ Design Application
- ☐ Reissue Application
- ☐ Plant Application
- ☐ Substitute Specification
Sub. Spec Filed _____
in App. No. _____ / _____
- ☐ Marked up Specification re
Sub. Spec. filed _____
In App. No. _____ / _____

SPECIFICATION

分光器およびこれを用いた共焦点光学系、走査型光学顕微鏡

BACKGROUND OF THE INVENTION

Field of the Invention

- 5 本発明は、分光器およびこれを用いた共焦点光学系、走査型光学顕微鏡に関する。

本出願は、特願平 2 0 0 2 - 2 9 6 3 2 9 号を基礎出願とし、その内容を取り込むものとする。

10 Description of Related Art

- 従来、この種の分光器としては、特開平 1 1 - 1 8 3 2 4 9 号公報に記載されたようなものがある。この構成を図 1 0 に示す。図 1 0 から、この分光器においては、光ファイバから射出された発散光が第 1 のレンズで平行光とされる。平行光は、回折格子により回折され特定の波長の光のみが第 2 のレンズに導かれる。
- 15 そして、第 2 のレンズで集光された光が出力スリットを通過して検出される。なお、回折格子を回転させることにより、検出する光の波長を変更することができる（例えば、特開平 1 1 - 1 8 3 2 4 9 号公報 段落番号 0 0 2 1 - 0 0 2 8、第 1 図参照）。

- また、他の従来技術としては、特開 2 0 0 2 - 1 2 2 7 8 7 号公報に記載されたスペクトル選択装置がある。この構成を図 1 1 に示す。このスペクトル選択装置は、予め定められたスペクトル領域を選択する手段を備え、スペクトル分解された光線と検出装置が互いにこれらの相対位置を可変できる構造になっている（例えば、特開 2 0 0 2 - 1 2 2 7 8 7 号公報 段落番号 0 0 0 6 - 0 0 2 8、第 1 図 参照）。

25

SUMMARY OF THE INVENTION

本発明は、以下の手段を提案している。

本願発明分光器は、光を通過するための入り口開口部材、この入り口開口部材から出射された発散光を略平行光にする第 1 の光学系、回転自在に配置され、前

- 記略平行光になった光束を分光する分光素子、この分光素子により分光された光束を焦点面近傍に集光する第2の光学系、前記焦点面近傍に配置され、スリット幅の長さが可変の可変幅スリット、前記スリット幅の長さまたは前記分光素子の回転の度合いに応じて、前記分光された光束のうち前記可変幅スリットを通過した光束を検出する光検出器を含む。

本願発明の分光器において、前記第2の光学系は、軸外光束に対しても前記複数の波長について収差が補正されていることが望ましい。

また本願発明の分光器において、前記第2の光学系は、複数のレンズから構成されていることが望ましい。

- 10 また本願発明の分光器において、前記第2の光学系は、焦点距離が正であるレンズと負であるレンズを少なくとも1枚ずつ含んで構成され、該焦点距離が正であるいずれかのレンズと負であるいずれかのレンズのアッベ数をそれぞれ ν_+ および ν_- としたとき、以下の関係を満たすことが望ましい。

[数1]

$$\nu_+ - \nu_- > 25$$

15

また本願発明の分光器において、前記分光素子が反射型平面回折格子であって、以下の関係を満たすことが望ましい。ただし、 α は、反射型平面回折格子に入射する光束の入射角、 N は、反射型平面回折格子の単位長さ当たりの格子本数、 m は、回折次数、 D は、第1の光学系を透過した後の光束直径である。

- 20 [数2]

$$0 < \frac{2.44 \cos \alpha}{NmD} < 0.04$$

また本願発明の分光器において、前記第1の光学系は、負の焦点距離をもつ第1のレンズ群と正の焦点距離をもつ第2のレンズ群とから構成されていることが望ましい。

- 25 また本願発明の分光器において、前記分光素子は、反射型平面回折格子であって、この反射型平面回折格子を回転させることと、前記可変幅スリットのスリット幅の長さを変化させることで、所望の波長の光束を選択的に前記光検出器で検

出することが望ましい。

また本願発明の分光器において、前記分光素子は、プリズム、このプリズムは回転させることなく固定した状態で、前記可変幅スリットのスリット幅の長さを変化させることで、所望の波長の光束を選択的に前記光検出器で検出することが望ましい。

また本願発明のレーザ走査型顕微鏡は、光源、前記光源から発した光を標本上に集光させる対物レンズ、前記標本からの反射光もしくは該標本から発生した光を集光する集光光学系、この集光光学系の集光点であって前記標本と光学的に共役な位置に配置される開口部材、この開口部材から出射された発散光を略平行光にする第1の光学系、回転自在に配置され、前記略平行光になった光束を分光する分光素子、この分光素子により分光された光束を焦点面近傍に集光する第2の光学系、前記焦点面近傍に配置され、スリット幅の長さが可変の可変幅スリット、前記スリット幅の長さまたは前記分光素子の回転の度合いに応じて、前記分光された光束のうち前記可変幅スリットを通過した光束を検出する光検出器を含むことが望ましい。

また本願発明のレーザ走査型顕微鏡において、前記開口部材は、ピンホールの開口を有することが望ましい。

また本願発明のレーザ走査型顕微鏡において、前記第2の光学系は、軸外光束に対しても前記複数の波長について収差が補正されていることが望ましい。

また本願発明のレーザ走査型顕微鏡において、前記第2の光学系は、複数のレンズから構成されていることが望ましい。

また本願発明のレーザ走査型顕微鏡において、前記第2の光学系は、焦点距離が正であるレンズと負であるレンズを少なくとも1枚ずつ含んで構成され、該焦点距離が正であるいずれかのレンズと負であるいずれかのレンズのアッベ数をそれぞれ ν_+ および ν_- としたとき、以下の関係を満たすことが望ましい。

[数1]

$$\nu_+ - \nu_- > 25$$

また本願発明のレーザ走査型顕微鏡において、前記分光素子が反射型平面回折

格子であって、以下の関係を満たすことが望ましい。ただし、 α は、反射型平面回折格子に入射する光束の入射角、 N は、反射型平面回折格子の単位長さ当たりの格子本数、 m は、回折次数、 D は、第1の光学系を透過した後の光束直径である。

5 [数 2]

$$0 < \frac{2.44 \cos \alpha}{NmD} < 0.04$$

また本願発明のレーザ走査型顕微鏡において、前記第1の光学系は、負の焦点距離をもつ第1のレンズ群と正の焦点距離をもつ第2のレンズ群とから構成されていることが望ましい。

10 また本願発明のレーザ走査型顕微鏡において、前記分光素子は、反射型平面回折格子であって、この反射型平面回折格子を回転させることと、前記可変幅スリットのスリット幅の長さを変化させることで、所望の波長の光束を選択的に前記光検出器で検出することが望ましい。

15 また本願発明のレーザ走査型顕微鏡において、前記分光素子は、プリズム、このプリズムは回転させることなく固定した状態で、前記可変幅スリットのスリット幅の長さを変化させることで、所望の波長の光束を選択的に前記光検出器で検出することが望ましい。

20 また本願発明のレーザ走査型顕微鏡において、前記開口部材の位置にその入射端を位置するように配置されるシングルモードファイバ、前記開口部材の代わりに前記シングルモードファイバが配置されることが望ましい。

25 また本願発明の共焦点光学系は、光源、前記光源から発した光を標本上に集光させる対物レンズ、前記標本からの反射光もしくは該標本から発生した光を集光する集光光学系、この集光光学系の集光点であって前記標本と光学的に共役な位置に配置される開口部材、この開口部材から出射された発散光を略平行光にする第1の光学系、回転自在に配置され、前記略平行光になった光束を分光する分光素子、この分光素子により分光された光束を焦点面近傍に集光する第2の光学系、前記焦点面近傍に配置され、スリット幅の長さが可変の可変幅スリット、前記スリット幅の長さまたは前記分光素子の回転の度合いに応じて、前記分光された光

束のうち前記可変幅スリットを通過した光束を検出する光検出器を含むことが望ましい。

- また本願発明の走査型光学顕微鏡においては、以下の関係を満たすことが望ましい。ただし、 $\Delta\lambda$ は波長 λ の光と波長 $(\lambda + \Delta\lambda)$ の光を分離するための波長分解能である。

[数 3]

$$\Delta\lambda < 20nm$$

- また本願発明の走査型光学顕微鏡においては、以下の関係を満たすことが望ましい。ただし、 $\Delta\lambda$ は波長 λ の光と波長 $(\lambda + \Delta\lambda)$ の光を分離するための波長分解能である。

[数 4]

$$\Delta\lambda < 5nm$$

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

- 図 1 は、本発明の第 1 の実施例にかかる分光器の構成図である。
- 図 2 は、異なる波長のスポットが位置をずらしながら並んでいる様子を表した模式図である。
- 図 3 は、本発明の第 3 の実施例にかかる分光機能を有するレーザ走査型顕微鏡の構成図である。
- 図 4 は、本発明の第 1 の実施例にかかる第 1 の光学系の断面図である。
- 図 5 は、本発明の第 1 の実施例にかかる第 2 の光学系の断面図である。
- 図 6 は、本発明の第 2 の実施例にかかる第 1 の光学系の断面図である。
- 図 7 は、本発明の第 4 の実施例にかかる分光機能を有するフローサイトメータの構成図である。
- 図 8 は、本発明の第 5 の実施例にかかる分光機能を有するレーザ走査型顕微鏡の構成図である。
- 図 9 は、本発明の第 6 の実施例にかかる分光器の構成図である。

図 10 は、従来例にかかる分光器の構成図である。

図 11 は、従来例にかかるスペクトル選択装置の構成図である。

図 12 は、波長分解能が悪い状態、良い状態での光量を示す図である。

5

DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

以下、本発明の実施形態に係る分光器およびこれを用いた共焦点光学系、走査型光学顕微鏡について図 1 から図 10 を参照して詳細に説明する。

本発明の実施形態に係る分光器は、図 1 より、入口開口としてのピンホール 1 と、第 1 の光学系 2 と、平面回折格子 3 と、第 2 の光学系 4 と、可変幅スリット 5 と、光検出器 6 と、ダイクロックミラー 7 とから構成されている。

ピンホール 1 を透過した発散光は、第 1 の光学系 2 により略平行光に変換されて、平面回折格子 3 に入射する。なお、ピンホール 1 を透過し発散する光束が、実質的に点光源から発散された光束としてみなすことができるピンホールの径は、ピンホール 1 を透過し発散する光線の NA と波長によって決められる。なお、第 1 の光学系 2 の数値データは後述の表 1（面番号 2 と 3）に記載されている。また、この数値データに基づく形状は図 4 に示されている。

平面回折格子 3 はその表面に溝が形成され、溝と略平行な軸に対して回転可能に構成されている。このような構成により、第 2 の光学系 4 の光軸と平行となる波長 λ_0 を選択することができる。平面回折格子 3 により回折され分光された波長 λ_0 の光束は、第 2 の光学系 4 の光軸と平行なまま第 2 の光学系 4 に入射する。第 2 の光学系 4 においては、その前側焦点位置付近に平面回折格子 3 が配置されている。

第 2 の光学系 4 に入射した各波長の光束は、略テレセントリックとなって射出する。そして、第 2 の光学系 4 の後側焦点位置付近において、それぞれの波長の光束が第 2 の光学系 4 の光軸に垂直な面内に集光される。また、可変幅スリット 5 は、前記の集光位置に配置され、その後方には、光検出器 6 が配置されている。ここで、本実施形態に係る第 2 の光学系 4 の結像性能は十分良好になっており、特に色収差が良好に補正されている。具体的な例は図 5 に示されている。図 5 に示されているように、第 2 の光学系 4 は、複数（ここでは 2 枚）のレンズで構成

されている。ここでは、負レンズと正レンズとからなる接合レンズになっている。
 このような構成により、スリット位置にできる各波長の集光スポットは十分に小
 さくなっている。よって、 $\Delta\lambda$ が小さい場合であっても、 λ_1 と $(\lambda_1 - \Delta\lambda)$ とのスポ
 ットが重なることなく、分離することができる。なお、第2の光学系4の数値デ
 ータは後述の表1（面番号5～7）に記載されている。

可変幅スリット5のスリット幅は、 λ_1 のスポットをスリットから透過させ、 $(\lambda_1 - \Delta\lambda)$ のスポットをスリットで遮断するように調整される。同様に、反対側につ
 いても、 λ_2 のスポットは透過させ、 $(\lambda_2 + \Delta\lambda)$ のスポットをスリットで遮断するよ
 うにスリットの位置が決められている。したがって、このとき、光検出器6で検
 出される波長は、 λ_1 から λ_2 までとなる。このように、設定できる波長の範囲は、
 平面回折格子3の回転角と可変幅スリット5の幅を調整することにより自由に決
 めることができる。

また、図1では、可変幅スリット5のスリット幅は、光検出器6に対して左右
 対称に配置された左右のスリット部材がそれぞれ移動するものである。しかし、
 一方のスリット部材のみ移動させ、他方のスリット部材を固定させても良い。

また、分光素子としてプリズムをしようとする場合は、平面回折格子3は回転
 をさせず、固定した状態で、可変幅スリットのスリット幅の長さの調整のみで可
 変幅スリットを通過させる波長帯を選択的に光検出器6に入射させるほうがより
 良い。

さらに、ピンホール1の形状は、使用状況に応じて、丸い以外の形状、例えば、
 三角形、四角形等の多角形などでも良い。

以下に、本実施形態に係る第1の実施例について、レンズデータ（表1参照）、
 を示す。

表1

単位：mm

面番号	曲率半径	間隔	n_d	V_d
1	∞	133		
2	∞	3.1	1.5168	67.166
3	-70.027	*		
4(反射回折面)	∞	24.1		
5	16.53	2.63	1.5638	60.798
6	-10.88	2.5	1.6726	32.209
7	-39.8	22.6		
8(可変スリット面)	∞			

*部は任意の長さ

本実施例においては、ピンホール1を透過し発散する光線のNAは0.011である。また、第1の光学系の焦点距離が135mmであるため、第1の光学系を透過した後、略平行光となった光束の径Dは、 $\phi 3$ mmである。さらに、回折面の溝本数は600本/mm、第1の光学系の光軸と第2の光学系の光軸のなす角は40度であり、回折格子の溝方向はこの2本の光軸のどちらとも垂直の関係にある。

これらの条件のときに、回折格子の回転角（回折面への光線の入射角）と、第2の光学系の光軸に平行に向う波長 λ_0 との関係は[表2]のようになる。また、波長 λ_0 を変化させたときの第2の光学系により集光されたスポットの直径（ここでは波動光学的に90%のエネルギーを包含する領域の直径として計算を行った。）と、波長が1nm変わったときのスポットの位置ずれ量の関係は[表3]のようになる。

表2

回転角 (度)	波長 λ_0 (nm)
7	704.62
8	651.24
9	597.67
10	543.92
11	490
12	435.93
13	381.27
14	327.42

表 3

λ_0 (nm)	スポット直径(μm)			スポット位置ずれ/1nm (μm)
	λ_0-50	λ_0	λ_0+50	
380		16.8	16.1	16.9
420	16.8	14.8	17.5	16.9
460	14.7	16.1	18.4	17
500	16.9	17.7	19.6	17.1
540	17.8	19.8	21.4	17.3
580	18.8	22.4	23.6	17.4
620	20.3	25.3	26.2	17.5
660	22.3	28.7		17.7
680	23.5	30.3		

図 2 は、波長 $(\lambda_0 - 1)$ 、 λ_0 、 $(\lambda_0 + 1)$ nm で直径 20 μm のスポットを有する
 5 光束が 18 μm ずつずれて並んでいる様子を示している。これによれば、波長 λ_0
 nm の光束と波長 $(\lambda_0 + 1)$ nm の光束とはスポットが重なって分離することが
 できないが、波長 $(\lambda_0 - 1)$ nm の光束と波長 $(\lambda_0 + 1)$ nm の光束とではスポ
 ットの重なりがないために分離できることが分かる。したがって、この場合の波
 長分解能 $\Delta\lambda$ は、1 nm よりも大きく 2 nm よりも小さいことがわかる。

10 また、本実施例において、平面回折格子 3 に入射する光束の入射角 θ 、平面回

折格子 3 の単位長さ当たりの格子本数 N 、回折次数 m 、第 1 の光学系を透過したのちの光束直径 D がそれぞれ、 $\alpha = 9^\circ$ 、 $N = 600$ 本/mm、 $m = 1$ 、 $D = 3$ mm として、これを以下の[数 6]に代入すれば、本実施例がこの条件を満たすことがわかる。

5 [数 6]

$$0 < \frac{2.44 \cos \alpha}{NmD} = \frac{2.44 \times 0.9877}{600 \times 1 \times 3} = 1.33 \times 10^{-3} < 0.04$$

なお、上記においては、光学系に色収差の発生がない場合を仮定して示したが、一般には、収差が発生してしまう。したがって、これを考慮すると、第 2 の光学系を通過したあと、スリット位置にできる波長 $\bar{\epsilon}_1$ の集光スポット直径（なお、こ
10 こでは波動光学的に 90% のエネルギーを包含する領域の直径とする。）を d_1 としたとき、以下の[数 7]を満足すれば $\bar{\epsilon}_1$ と $(\bar{\epsilon}_1 - \Delta \bar{\epsilon})$ との波長を分離することができる。

[数 7]

$$d_1 < \frac{Nmf}{\cos \beta} \Delta \lambda$$

15 ここで、 $\Delta \bar{\epsilon}$ は波長 $\bar{\epsilon}$ の光と波長 $(\bar{\epsilon} - \Delta \bar{\epsilon})$ の光を分離できる波長分解能を、 α は反射型平面回折格子に入射する光束の出射角を、 N は反射型平面回折格子の単位長さあたりの格子本数を、 m は回折次数を、 f は第 2 の光学系の焦点距離を示す。

また、波長分解能 $\Delta \bar{\epsilon}$ を先に決定し、上記[数 7]を満足するような第 2 の光学系
20 を構成すれば、波長分解能 $\Delta \bar{\epsilon}$ の分光器が実現できる。さらに、波長 $\bar{\epsilon}_2$ の集光スポット直径を d_2 とすると、[数 7]の d_1 を d_2 に置き換えることにより、波長 $\bar{\epsilon}_2$ の光と $(\bar{\epsilon}_2 + \Delta \bar{\epsilon})$ の光を分離することができる。なお、第 2 の光学系を構成する[表 1]の第 5 - 6 面の接合レンズは、[数 1]の関係を満たしている。

次に、本発明の実施形態に係る第 2 の実施例について説明する。第 2 の実施例
25 にかかる分光器は、第 1 の実施例において、第 1 の光学系（[表 1]の面番号 2 か

ら 3) を以下の[表 4]のレンズに置き替えて構成されている。すなわち、本実施例においては、第 1 の光学系を負の焦点距離をもつ第 1 のレンズ群と正の焦点距離をもつ第 2 のレンズ群とから構成することにより、いわゆるテレフォトタイプとなり、点光源からレンズ最終面までの距離が焦点距離よりも短くなっている。

- 5 したがって、本実施例によれば、第 1 の実施例において、ピンホール 1 から第 1 の光学系最終面までの距離が 1 3 6 . 1 mmであったものを、焦点距離や光学的な結像性能をほとんど変えることなく 6 0 mm以上縮めることができる。

表 4

単位 : mm

面番号	曲率半径	間隔	n_d	v_d
1 1	∞	56.8		
1 2	55.412	1	1.7552	27.511
1 3	6.101	8.7		
1 4	59.904	3.5	1.4875	70.235
1 5	-10.454	*		

* 部は任意の長さ

- 10 次に、図 3 を参照して第 3 の実施例について説明する。

第 3 の実施例にかかるレーザ走査型顕微鏡は、光源 5 0 1 と、ビームエキスパ
ンダ 5 0 2 と、ビームスプリッタ 5 0 3 と、光偏向器 5 0 4、5 0 5 と、瞳伝送
光学系 5 0 6、瞳投影光学系 5 0 7 と、対物レンズ 5 0 8 と、標本 5 0 9 と、コ
ンフォーカルレンズ 5 1 4 と、共焦点ピンホール 5 1 5 と、分光器（第 1 の実施
15 例に示された分光器）5 1 6 とから構成されている。

- レーザ光源 5 0 1 を出射した光線は、ビームエキスパンダ 5 0 2 により適当な
径の光束となり光偏向器 5 0 4 により偏向される。偏向された光束は瞳伝送光学
系 5 0 6、第 2 の光偏向器 5 0 5、瞳投影光学系 5 0 7 および対物レンズ 5 0 8
を通り、標本 5 0 9 上を走査されて標本 5 0 9 を励起する。標本 5 0 9 から発せ
20 られた蛍光は光学系を先程とは逆に進行し、デスキャンされてビームスプリッタ
5 0 3 に入射する。

ビームスプリッタ 5 0 3 で偏向された蛍光成分は、コンフォーカルレンズ 5 1

4に入射し集光されて分光器516内のピンホール1を通る。ピンホール1を通った蛍光は分光器516内において、点光源として用いられる。本実施例においては、分光器として第1の実施例で説明した分光器を用いているため、これによって、分光機能を備えたレーザ走査型顕微鏡を構成することができる。

5 次に、図7を参照して第4の実施例について説明する。

第4の実施例にかかるレーザ走査型顕微鏡は、標本としてフローサイトメータ用の標本510を用いた例である。

レーザ光源501を出射した光線は、ビームエキスパンダ502により適当な径の光束となり対物レンズ508で集光されて標本510に照射される。標本510は、細胞あるいは染色体等の細胞成分を液体に浮遊させて、流体系の中を高速で通過させてある。

レーザ光により励起され標本510から発せられた蛍光は光学系を先程とは逆に進行し、ビームスプリッタ503に入射する。ビームスプリッタ503に入射した蛍光成分は偏向され、コンフォーカルレンズ514に入射し集光されて分光器516内のピンホール1を通る。ピンホール1を通った蛍光は分光器516内において、点光源として用いられる。本実施例においては、分光器として第1の実施例で説明した分光器を用いているため、これによって、分光機能を備えたフローサイトメータを構成することができる。

次に、図8を参照して第5の実施例について説明する。

20 第5の実施例にかかるレーザ走査型顕微鏡は、第3の実施例に対して、コンフォーカルレンズ514と分光器516の間にシングルモードファイバ517を備えた構成となっている。したがって、光学的な作用はコンフォーカルレンズ514に光線が至るまでは、第3の実施例と同様である。コンフォーカルレンズ514で集光された光は、シングルモードファイバの入射端から入射し、出射端から
25 射出される光が分光器516の点光源として機能している。

本実施形態においては、シングルモードファイバ517を備えたことから、入射端をコンフォーカルレンズ514の集光位置に、出射端を分光器516の点光源の位置に配置すれば、シングルモードファイバ517の長さを可変することにより、レーザ走査型顕微鏡と分光器との位置関係を自由に選択できるため、配置

の自由度があり、かつ、分光機能を有したレーザ走査型顕微鏡を構成することができる。

次に、図 9 を参照して第 6 の実施例について説明する。

第 6 の実施例は 2 チャンネルの分光器を示したものである。この分光器は、図 5 1 に示した第 1 の光学系 2 と平面回折格子 3 との間にビームスプリッタ、偏光ビームスプリッタあるいはダイクロイックミラー 7 のいずれかひとつ若しくはこれに類するものを配置して光路を分割することにより構成されている。なお、分割された光路の先、すなわち、平面回折格子 3 から光検出器 6 までの構成は、図 1 と同様である。こうした構成とすることにより、2 チャンネルの分光器を実現する 10 ことができる。なお、本実施例の分光器を実施例 3 から 5 の分光器と置き換えて構成することもできる。

以上、図面を参照して本発明の実施の形態について詳述してきたが、具体的な構成はこれらの実施の形態に限られるものではなく、この発明の要旨を逸脱しない範囲の設計変更等も含まれる。例えば、第 1 の実施例においては、ピンホール 15 の径を光線の NA、光線の波長によって定めると説明したが、光学系を構成する各構成要素を勘案して、ピンホール径に自由度をもたせるように可変径ピンホールを用いてもよい。

また、第 1 の実施例および[表 1]においては、第 2 の光学系を接合レンズとして説明したが、[数 1]の要件を満たすものであれば、互いに隔たった 2 枚以上の 20 レンズで構成してもよい。また、第 4 の実施例においては、分光器の光源をピンホールであるとして説明したが、ピンホールでなくても構わない。

以上のように、この発明によれば、分光素子により分光された光を集光する第 2 の光学系が光軸外においても複数の波長について収差が補正される構成となっているため、検波波長帯域が可変で波長分解能の高い分光器を構成することがで 25 きる。また、点光源からの発散光を略平行光とする第 1 の光学系を負の焦点距離をもつレンズと正の焦点距離をもつレンズとで構成したことから、コンパクトで組立性のよい分光器を構成することができる。

また本願発明によれば、第 2 の光学系により光軸外の複数の波長についても収差が補正されているため、波長 $\{\lambda_1 \mid \lambda_1 < \lambda < \lambda_2\}$ を一度に検出するためにスリット

幅を広げたとしても、 $\bar{\epsilon}_1$ および $\bar{\epsilon}_2$ において良好なスポットを得ることができる。したがって、このような構成によれば、波長分解能の高い分光器を実現することができる。なお、出射端は、レンズにより集光されたスポット、あるいはそのスポット位置に配置された開口（スリットやピンホール）、光ファイバー端面などがある。あるいは、その開口や光ファイバーの端面の面積が十分小さい、いわゆる実質的な点光源が出射端になる。

また本願発明によれば、第2の光学系は複数のレンズから構成されているため、これらを組み合わせることにより、軸外の色収差を良好に補正することができる。

また本願発明によれば、焦点距離が正であるレンズと負であるレンズはこの条件を満足するアッペ数を有しているため、これらのレンズを組み合わせることにより、第2の光学系がアクロマートレンズを一枚含む構成となる。したがって、アクロマートレンズの作用により、軸上の色収差はもとより軸外の色収差も良好に補正できる。

本願発明では、 α は、反射型平面回折格子に入射する光束の入射角、 N は、反射型平面回折格子の単位長さ当たりの格子本数、 m は、回折次数、 D は、第1の光学系を透過した後の光束直径である。

波長 $\bar{\epsilon}$ の光と波長 $(\bar{\epsilon} + \Delta\bar{\epsilon})$ の光を分離できる波長分解能を $\Delta\bar{\epsilon}$ とすると、次の[数5]の関係が成立する。

[数5]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} > \frac{2.44 \cos \alpha}{NmD}$$

20

これは、第2の光学系において、十分に色収差の発生が抑えられていることを条件として、第2の光学系を通過した後、集光された波長 $\bar{\epsilon}$ および $(\bar{\epsilon} + \Delta\bar{\epsilon})$ のスポットが重ならないための条件を示している。すなわち、[数5]の右辺の項は、分光器の波長分解能を表す一つの指標である。一方で、現在の生物系LSM（LSM：Laser Scanning Microscopy）において、蛍光波長（約500nm）を分離するのに用いられる吸収フィルタの波長分解能は10nmから20nmである。したがって、この発明によれば、上記関係式を満足することにより、現在の生物系LSMに用いられる吸収フィルタと同程度の波長分解能をもつ分光器を実現する

25

ことができる。

また本願発明によれば、前記第1の光学系を負の焦点距離をもつ第1のレンズ群と正の焦点距離をもつ第2のレンズ群とから構成することにより、いわゆるテレフォトタイプとなり、点光源からレンズ最終面までの距離が焦点距離よりも短くなる。また、このとき、点光源からの出射のNAは同じであるため、位置決め精度はそのままで、他の同じ焦点距離を持つ光学系と比較してレンズ系の全長が短くなる。したがって、これにより装置全体をコンパクトにすることができる。

この発明によれば、共焦点光学系を構成する光検出部に、波長分解能に優れた分光器を用いたため、ノイズの少ない分光が可能になる。例えば、蛍光染色した細胞を細い水流に流し、レーザ照射により得られる蛍光や散乱光を解析することにより、細胞絶対数や粒子サイズ等の細胞の性質を解析するフローサイトメータに分光機能を持たせた装置を実現することができる。

この発明によれば、走査型光学顕微鏡を構成する分光器に、波長分解能に優れた分光器を用いたため、任意の波長を選択して検出を行ったり、同一点から異なる波長帯の信号を検出する走査型光学顕微鏡を実現することができる。

この発明によれば、このような構成にすることにより、走査顕微鏡部と分光器部とを近接配置する必要がないため、配置の自由度が高く、しかも分光機能を有する走査型光学顕微鏡を実現することができる。

$\Delta\lambda$ は波長 λ の光と波長 $(\lambda + \Delta\lambda)$ の光を分離するための波長分解能である。

この発明によれば、波長分解能を20 nmよりも小さい条件としたことから、現在、生物系LSMに用いられている吸収フィルタと同程度の波長分解能をもつ装置を実現することができる。

本願発明では、 $\Delta\lambda$ は波長 λ の光と波長 $(\lambda + \Delta\lambda)$ の光を分離するための波長分解能である。したがって、波長分解能を5 nmよりも小さい条件としたことから、接近する2つの波長を、より正確に分離することが可能となる。よって、例えば蛍光観察を行う装置では、蛍光波長の近い蛍光色素も使用することができる。すなわち、より多くの種類の蛍光色素を使用することができる。

What is claimed is:

1. 分光器は以下を含む：

光を通過するための入り口開口部材；

- 5 この入り口開口部材から出射された発散光を略平行光にする第1の光学系；
 回転自在に配置され、前記略平行光になった光束を分光する分光素子；
 この分光素子により分光された光束を焦点面近傍に集光する第2の光学系；
 前記焦点面近傍に配置され、スリット幅の長さが可変の可変幅スリット；
 前記スリット幅の長さまたは前記分光素子の回転の度合いに応じて、前記分光
 10 された光束のうち前記可変幅スリットを通過した光束を検出する光検出器。

2. クレーム1の分光器において：

前記第2の光学系は、軸外光束に対しても前記分光された光束について収差が
 補正されている。

15

3. クレーム2の分光器において、；

前記第2の光学系は、複数のレンズから構成されている。

4. クレーム3の分光器において：

- 20 前記第2の光学系は、焦点距離が正であるレンズと負であるレンズを少なくと
 も1枚ずつ含んで構成され、該焦点距離が正であるいずれかのレンズと負である
 いずれかのレンズのアッベ数をそれぞれ ν_+ および ν_- としたとき、以下の関係を
 満たす。

$$\nu_+ - \nu_- > 25$$

25

5. クレーム4の分光器において：

前記分光素子が反射型平面回折格子であって、以下の関係を満たす。ただし、
 α は、反射型平面回折格子に入射する光束の入射角、Nは、反射型平面回折格子

の単位長さ当たりの格子本数、 m は、回折次数、 D は、第1の光学系を透過した後の光束直径である。

$$0 < \frac{2.44 \cos \alpha}{NmD} < 0.04$$

5 6. クレーム5の分光器において：

前記第1の光学系は、負の焦点距離をもつ第1のレンズ群と正の焦点距離をもつ第2のレンズ群とから構成されている。

7. クレーム2の分光器において：

- 10 前記分光素子は、反射型平面回折格子である、この反射型平面回折格子を回転させることと、前記可変幅スリットのスリット幅の長さを変化させることで、所望の波長の光束を選択的に前記光検出器で検出する。

8. クレーム2の分光器において：

- 15 前記分光素子は、プリズム、このプリズムは回転させることなく固定した状態で、前記可変幅スリットのスリット幅の長さを変化させることで、所望の波長の光束を選択的に前記光検出器で検出する。

9. レーザ走査型顕微鏡は以下を含む：

- 20 光源；
前記光源から発した光を標本上に集光させる対物レンズ；
前記標本からの反射光もしくは該標本から発生した光を集光する集光光学系；
この集光光学系の集光点であって前記標本と光学的に共役な位置に配置される開口部材
- 25 この開口部材から出射された発散光を略平行光にする第1の光学系；
回転自在に配置され、前記略平行光になった光束を分光する分光素子；
この分光素子により分光された光束を焦点面近傍に集光する第2の光学系；
前記焦点面近傍に配置され、スリット幅の長さが可変の可変幅スリット；

前記スリット幅の長さまたは前記分光素子の回転の度合いに応じて、前記分光された光束のうち前記可変幅スリットを通過した光束を検出する光検出器。

10. クレーム9のレーザ走査型顕微鏡において：

5 前記開口部材は、ピンホールの開口を有する。

11. クレーム10のレーザ走査型顕微鏡において：

前記第2の光学系は、軸外光束に対しても前記複数の波長について収差が補正されている。

10

12. クレーム11のレーザ走査型顕微鏡において：

前記第2の光学系は、複数のレンズから構成されている。

13. クレーム12のレーザ走査型顕微鏡において：

15 前記第2の光学系は、焦点距離が正であるレンズと負であるレンズを少なくとも1枚ずつ含んで構成され、該焦点距離が正であるいずれかのレンズと負であるいずれかのレンズのアッベ数をそれぞれ ν_+ および ν_- としたとき、以下の関係を満たす。

$$\nu_+ - \nu_- > 25$$

20

14. クレーム13のレーザ走査型顕微鏡において：

前記分光素子が反射型平面回折格子であって、以下の関係を満たす。ただし、 α は、反射型平面回折格子に入射する光束の入射角、 N は、反射型平面回折格子の単位長さ当たりの格子本数、 m は、回折次数、 D は、第1の光学系を透過した
25 後の光束直径である。

$$0 < \frac{2.44 \cos \alpha}{NmD} < 0.04$$

15. クレーム14のレーザ走査型顕微鏡において：

前記第1の光学系は、負の焦点距離をもつ第1のレンズ群と正の焦点距離をもつ第2のレンズ群とから構成されている。

5 16. クレーム11のレーザ走査型顕微鏡において：

前記分光素子は、反射型平面回折格子である、この反射型平面回折格子を回転させることと、前記可変幅スリットのスリット幅の長さを変化させることで、所望の波長の光束を選択的に前記光検出器で検出する。

10 17. クレーム11のレーザ走査型顕微鏡において：

前記分光素子は、プリズム、このプリズムは回転させることなく固定した状態で、前記可変幅スリットのスリット幅の長さを変化させることで、所望の波長の光束を選択的に前記光検出器で検出する。

15 18. クレーム11のレーザ走査型顕微鏡において：

前記開口部材の位置にその入射端を位置するように配置されるシングルモードファイバ、前記開口部材の代わりに前記シングルモードファイバが配置される。

19. 共焦点光学系は以下を含む：

20 光源；

前記光源から発した光を標本上に集光させる対物レンズ；

前記標本からの反射光もしくは該標本から発生した光を集光する集光光学系；

この集光光学系の集光点であって前記標本と光学的に共役な位置に配置される開口部材

25 この開口部材から出射された発散光を略平行光にする第1の光学系；

回転自在に配置され、前記略平行光になった光束を分光する分光素子；

この分光素子により分光された光束を焦点面近傍に集光する第2の光学系；

前記焦点面近傍に配置され、スリット幅の長さが可変の可変幅スリット；

前記スリット幅の長さまたは前記分光素子の回転の度合いに応じて、前記分光

された光束のうち前記可変幅スリットを通過した光束を検出する光検出器。

20. 請求項9に記載のレーザ走査型光学顕微鏡であって、以下の関係を満たす。
ただし、 $\Delta\lambda$ は波長 λ の光と波長 $(\lambda + \Delta\lambda)$ の光を分離するための波長分解能である。

$$\Delta\lambda < 20nm$$

21. 請求項9に記載のレーザ走査型光学顕微鏡。ただし、 $\Delta\lambda$ は波長 λ の光と波長 $(\lambda + \Delta\lambda)$ の光を分離するための波長分解能である。

$$\Delta\lambda < 5nm$$

ABSTRACT OF THE DISCLOSURE

- 複数の波長からなる発散光を出射する実質的な点光源と、該点光源から出射された発散光を略平行光にする第1の光学系と、該第1の光学系により略平行光になった光束を分光する分光素子と、該分光素子により分光された光束を焦線近傍に集光する第2の光学系とを備えた分光器において、第2の光学系が光軸外においても前記複数の波長について収差が補正されるようにすることにより、波長分解能が高い分光器を提供することができる。
- 5